بررسی بهبود عملکرد مشعل متخلخل با جریان شعاعی در مقایسه با مشعل‌های متخلخل جریان محوری*

مهدی معرفت(۱) محمد رضا آسترکی(۲) مصطفی خسروی الحسینی(۳)

چکیده *در تحقیقات انجام شده روی مشعل‌های متخلخل عموما جریان محوری مد نظر قرار گرفته است. در این تحقیق مشعل متخلخل با جریان شعاعی و هم‌چنین با جریان محوری به صورت عددی یک بعدی مدل‌سازی شده و کارایی مشعل‌های شعاعی و محوری با مصرف سوخت یکسان مقایسه شده است. با استفاده از مکانیزم پانزده مرحله‌ای در شبیه سازی احتراق، برآوردی دقیق از تولید آلاینده ها انجام گردید. نتایج نشان داد که مشعل شعاعی به دلیل توزیع دما، توزیع سرعت، میزان انتشار آلاینده‌ها و بازده تشعشع خروجی، عملکرد بهتری دارد. به طوری که انتشار آلاینده‌های CO و NO در مشعل جریان شعاعی نسبت به مشعل جریان محوری، کمتر و بازده تشعشع خروجی آن بالاتر است.*

واژه‌های کلیدی مشعل متخلخل، جریان شعاعی، انتشار آلاینده ها، کارایی

Investigation on Improvement of Radial Porous Burners in Comparison to Conventional Porous Burners

M. Maerefat M.R. Astaraki M. Khosravi Elhossaini

Abstract *In studies done on porous burner, generally burners with axial flow are considered. In this paper, porous burners with radial and axial flow have been modeled numerically and results of radial and axial porous burners with equal fuel consumptions are compared. The mechanism used in combustion phenomenon is 15 stage mechanisms which predict the pollutions production precisely. The results show a significant enhancement of the radial burner performance from viewpoint of temperature distribution, velocity distribution, amount of emissions, and thermal radiation efficiency. The CO and NO emissions are lower and the output radiative power in the radial burner is higher than those of the axial burner.*

Key Words Porous Burner, Radial Flow, Pollutants emission, Performance

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۸۹/۹/۲۰ نسخه پذیرش آن در تاریخ ۹۰/۸/۹ و نسخه آماده چاپ آن در تاریخ ۹۰/۱۰/۲۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(۳) استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه صنعت نفت

مقدمه

مشعل‌های متخلخل به‌دلیل عملکرد مطلوبشان در صنعت، جایگاه ویژه‌ای دارند. اکثر این مشعل‌ها به صورت استوانه‌ای ساخته می شوند، در واقع یکی از پیکره‌بندی‌های ممکن برای مشعل متخلخل، پیکره بندی استوانه‌ای است. در این هندسه دو نوع جریان می‌توان متصور شد، یکی این که جریان در مشعل به صورت محوری حرکت کند، چنین جریانی در هندسه‌ی استوانه توسط خسروی و همکارانش [1] بررسی شد و اثر افت فشار بر روی عملکرد مشعل، مورد مطالعه قرار گرفت. آنها هم‌چنین در تحقیق دیگری اثر انتقال حرارت جانبی را در هندسه‌ی استوانه با جریان محوری بررسی نمودند [2]. در مشعل‌های متداول در صنعت و بررسی‌های علمی که به صورت شبیه سازی عددی انجام شده، مشعل با جریان محوری منظور شده است. ولی نوع دیگر جریان در این هندسه می تواند جریان شعاعی باشد. حرکت شعاعی سیال در مشعل، کاهش سرعت در راستای حرکت را به همراه دارد و این عامل سبب پایداری طبیعی شعله در مشعل می‌گردد. کمال و محمد [3] این نوع جریان را برای بهبود پایداری شعله و بازیافت گرمایی بهتر در مشعل پیشنهاد نمودند. علاوه بر جریان شعاعی در هندسه‌ی استوانه‌ای، جریان شعاعی در هندسه‌ی کروی نیز بهبود پایداری شعله را در پی دارد [4].

برای سرعت‌های ورودی بالا که در مشعل با جریان محوری، نمی‌توان شعله‌ی پایدار داشت، در مشعل با جریان شعاعی می‌توان شعله‌ی پایدار تشکیل داد. از دیگر ویژگی‌های چنین مشعلی، کاهش میزان آلاینده‌ی CO است که دلیل اصلی این پدیده نیز کم شدن سرعت در راستای شعاعی و در نتیجه افزایش زمان ماندگاری (Residence time) است. از طرف دیگر در نتیجه‌ی افزایش سطح مقطع در راستای جریان و انتقال گرمای تشعشعی بالاتر، دمای گاز کاهش یافته و این عاملی است در جهت کاهش تولید NO.

تاکنون چند حل عددی برای مشعل متخلخل با جریان شعاعی ارایه شده است. زدانوک و همکارانش پایداری شعله در مشعل متخلخل استوانه‌ای و کروی را بررسی نمودند و مسأله‌ی پایداری در دو هندسه را با هم مقایسه کردند [5]. آنها یک حل تحلیلی با تقریب یک دمایی (با این فرض که ضریب انتقال گرمای داخلی بسیار بزرگ باشد) برای مسأله ارایه نمودند. هم‌چنین آنها مسأله را با مدل دو دمایی و با استفاده از مکانیزم تک مرحله ای به صورت عددی حل نمودند. در حل تحلیلی آنها برای برخی از مقادیر جریان جرم ورودی دو شعاع برای نقطه‌ی تثبیت شعله به‌دست آمد که اگر اشتعال در فاصله‌ی این دو نقطه اتفاق بیفتد، ناحیه‌ی تشکیل شعله به سمت شعاع کوچکتر، میل می‌کند. هم‌چنین آنها دریافتند در مختصات کروی، برای آن‌که شعله درون محیط متخلخل تشکیل شود طول بیشتری نسبت به استوانه را باید پیشگرم کرد. زدانوک و همکارانش در مقاله‌ی دیگری [6] اثرات خواص تشعشعی محیط بر عملکرد مشعل متخلخل استوانه‌ای و کروی را تحلیل نمودند. در هر دو حل عددی ذکر شده مکانیزم تک‌ای برای شبیه سازی فرآیند احتراق مورد استفاده بود و تنها به مسأله‌ی پایداری شعله پرداخته شد و بحثی در مورد اثرات این شعاعی بودن جریان بر میزان آلاینده‌ها صورت نگرفت.

کمال و محمد [7] یک کار آزمایشگاهی روی مشعل متخلخل با جریان شعاعی انجام دادند، آنها در مقاله‌ی خود توزیع دما، میزان انتشار آلاینده‌ها و بازده تشعشع خروجی را گزارش نمودند. نتایج کار آزمایشگاهی آنها نشان داد که جریان شعاعی در مشعل متخلخل به دلیل کاهش سرعت در راستای جریان و انتقال گرمای تشعشی بیشتر در محیط متخلخل علاوه بر ایجاد پایداری بهتر شعله می‌تواند سبب کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها نیز بشود. نتایج شبیه سازی عددی تحقیق حاضر با نتایج به‌دست آمده در تحقیق تجربی [7] مقایسه گردیده است.

همان‌گونه که اشاره شد احتراق درون محیط متخلخل با جریان شعاعی، کاهش سرعت با افزایش شعاع را به‌دنبال دارد. از آن‌جا که احتراق باعث افزایش ناگهانی دمای گاز می‌گردد و افزایش دما با کاهش دانسیته همراه است، بنابراین به واسطه‌ی پیوستگی، سرعت گازهای حاصل از احتراق، افزایش ناگهانی می‌یابد. در مشعل‌های جریان محوری برای پیش‌گیری از این مسأله، یکی از راه‌کارهای پیشنهادی، افزایش سطح مقطع مشعل بعد از جبهه‌ی شعله است. از طرف دیگر این افزایش سطح مقطع نابه‌سامانی‌هایی را در الگوی حرکت جریان پدید می‌آورد که عموماً کنترل آنها مشکل است.

در تحقیق حاضر مشعل متخلخل با جریان شعاعی و هم‌چنین با جریان محوری مطالعه شده است. با در نظر گرفتن مکانیزم احتراقی ۱۵مرحله‌ای امکان برآورد صحیح تولید آلاینده ها فراهم شده و عملکرد دو مشعل از نظر پروفیل سرعت، دما، انتشار آلاینده‌ها و توان تشعشعی خروجی با یکدیگر مقایسه شده‌است. نتایج به‌دست آمده میزان بهبود عملکرد مشعل متخلخل با جریان شعاعی، نسبت به مشعل با همان مصرف سوخت و جریان محوری را به‌طور کمی بیان می‌کند.

معادلات حاکم و روش حل

برای مطالعه‌ی تأثیر جریان شعاعی بر رفتار مشعل متخلخل، مشعل به‌صورت یک بعدی مدل شده است تا به‌واسطه‌ی آن بتوان تاثیر کاهش سرعت و افزایش سطح مقطع در راستای شعاع را بر عملکرد مشعل بررسی نمود. استفاده از مدل یک بعدی با دقت قابل قبول می‌تواند رفتار یک مشعل واقعی جریان محوری که سطح جانبی آن و یا یک مشعل واقعی جریان شعاعی که قاعده‌هایش عایق‌بندی شده‌اند را نشان بدهد [2].

معادلات حاکم بر مسأله شامل معادلات پیوستگی، انرژی گاز، انرژی جامد، انتقال گرمای تشعشعی، بقای گونه‌های شیمیایی و معادله‌ی حالت گاز می‌باشند.

پیوستگی:

$$\frac{d}{dx}(\rho_g uA\varphi) = 0 \qquad (۱)$$

انرژی گاز:

$$\rho_g uA\varphi\frac{dT_g}{dx} - \frac{1}{c_{pg}}\frac{d}{dx}\lambda_g A\varphi\frac{dT_g}{dx} + \frac{A}{c_{pg}}\varphi\sum_{k=1}^{K}\rho\, Y_k V_k c_{pk}\frac{dT_g}{dx} + \frac{A}{c_{pg}}\varphi\sum_{k=1}^{K}\dot{\omega}_k h_k W_k - \frac{A}{c_{pg}}\varphi H_V(T_s - T_g) = 0 \qquad (۲)$$

انرژی جامد:

$$\frac{d}{dx}\lambda_s(1-\phi)A\frac{dT_s}{dx} - (1-\phi)AH_V(T_s - T_g) - \frac{d((1-\phi)Aq_{rad})}{dx} = 0 \qquad (۳)$$

انتقال‌گرمای تشعشعی:

$$\frac{dI(\vec{r},\hat{s})}{ds} = -\beta I(\vec{r},\hat{s}) + \sigma_a I_b + \frac{\sigma_s}{4\pi}\int_{4\pi} I(\vec{r},\hat{s})\Phi(\hat{s}',\hat{s})d\Omega' \qquad (٤)$$

بقای گونه‌ها:

$$\rho uA\varphi\frac{dY_k}{dx} + \frac{d}{dx}(\rho A\varphi Y_k V_k) - A\varphi\dot{\omega}_k W_k = 0, (k = 1,..,K) \qquad (٥)$$

حالت گاز:

$$\rho = \frac{p\overline{W}}{RT} \qquad (٦)$$

در معادله‌ی (٦) $\overline{W}$ وزن مولکولی متوسط جریان سیال و $\overline{R}$ ثابت جهانی مولی است. ترم q_{rad} شار گرمای تشعشعی است که از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود:

$$\frac{dq_{rad}}{dx} = (\beta - \sigma_s)(۴\sigma T^{۴} - G), \quad G = \int_{۴\pi} I d\Omega \qquad (۷)$$

در رابطه‌ی (۷) Ω زاویه‌ی فضایی است.

در معادلات (۵-۱) وقتی که مشعل دارای جریان محوری باشد سطح مقطع عبور جریان (A) ثابت و هنگامی که مشعل دارای جریان شعاعی باشد سطح مقطع عبور جریان متغیر و برابر $A = ۲\pi x$ است. علاوه بر آن مختصات x در مشعل محوری (شکل ۱- (a)) نشانگر مختصات طولی در راستای

جریان و در مشعل شعاعی نشانگر مختصات شعاعی (شکل ۱-(b)) در راستای جریان می‌باشد. برای ایجاد امکان مقایسه نتایج، مختصات طولی مشعل محوری از عدد یک در سطح ورودی و مختصات شعاعی در مشعل شعاعی از سطح ورودی که همان سطح داخلی استوانه وبا شعاع یک است انتخاب گردید.

برای حل معادلات (۷-۱) کد معروف PREMIX از مجموعه‌ی CHEMKIN که جهت شبیه سازی شعله‌ی آزاد یک‌بعدی و آرام به کار می‌رود [8]، برای شبیه‌سازی احتراق درون محیط متخلخل توسعه یافته است. به این منظور معادلات بقای انرژی جامد و انتقال گرمای تشعشعی به مجموعه‌ی معادلات قابل حل بالا اضافه گردید. هم‌چنین تغییراتی در دیگر معادلات جهت حل محیط متخلخل در کد PREMIX انجام پذیرفت. حل معادلات در سه مرحله انجام می‌شود، یعنی ابتدا با استفاده از یک حدس اولیه‌ی دما یک توزیع برای گونه های شیمیایی به‌دست می‌آید. در مرحله‌ی دوم با استفاده از توزیع به‌دست آمده از مرحله‌ی اول به‌عنوان حدس اولیه، معادلات انرژی، بقای گونه‌ها و پیوستگی بدون در نظر گرفتن تشعشع حل می‌شوند. در مرحله‌ی سوم نیز با استفاده از جواب مرحله‌ی دوم برای توزیع اولیه تمامی معادلات به‌طور ضمنی حل می‌گردند.

برای حل معادله‌ی انتقال گرمای تشعشعی از روش جهت‌های مجزا استفاده شده است، در این روش، معادله‌ی تبادل گرمای تشعشعی به یک دستگاه معادلات مشتق جزئی تبدیل می‌شود که هر معادله‌ی آن برای یک جهت فضایی نوشته می‌شود. مجموع این جهات باید یک کره با زاویه‌ی 4π را پوشش دهد.

با توجه به تحقیقات انجام شده روی مکانیزم‌های احتراقی، یک نمونه مکانیزم مناسب که از لحاظ زمان محاسبات و دقت نتایج، مناسب باشد انتخاب شده است [9]. مکانیزم انتخاب شده مکانیزم ۱۵ مرحله‌ای کاهش یافته بر پایه مکانیزم GRI3.0 می‌باشد. خسروی و همکاران دقت مکانیزم‌های کاهش یافته‌ی GRI3.0 و میلر را با سینتیک‌های کامل آنها مقایسه کردند [10]. نتایج تحقیق آنها نشان داد مکانیزم کاهش یافته‌ی GRI3.0 در مقایسه با مکانیزم کامل GRI3.0 دارای دقت مناسبی است و از طرفی زمان محاسبات آن نیز کمتر است. در جدول (۱) شرایط مرزی لازم در حل معادلات (۵-۱) نشان داده شده است.

جدول ۱ شرایط مرزی لازم در حل مسأله

	سرعت	دمای گاز	دمای جامد	گونه ها	تشعشع
ورودی	$u = u_{in}$	$\dot{m} c_{pg}(T_{g,in} - T_g) = -k_g \frac{dT_g}{dx}$	$H_V(T_{g,in} - T_s) + \sigma\varepsilon(T_{suruond}^4 - T_g^4) = -k_s \frac{dT_s}{dx}$	$Y = Y_{in}$	$I(\vec{r},\hat{s}) = \varepsilon_{in} I_b + \frac{1-\varepsilon_{in}}{4\pi} \times \int_{4\pi} I(\vec{r},\hat{s}).\lvert\hat{s}'.\hat{n}\rvert d\Omega'$
خروجی	–	$\frac{dT_g}{dx} = 0$	$H_V(T_{g,out} - T_s) + \sigma\varepsilon(T_{suruond}^4 - T_g^4) = -k_s \frac{dT_s}{dx}$	$\frac{dY}{dx} = 0$	$I(\vec{r},\hat{s}) = \varepsilon_{out} I_b + \frac{1-\varepsilon_{out}}{4\pi} \times \int_{4\pi} I(\vec{r},\hat{s}).\lvert\hat{s}'.\hat{n}\rvert d\Omega'$

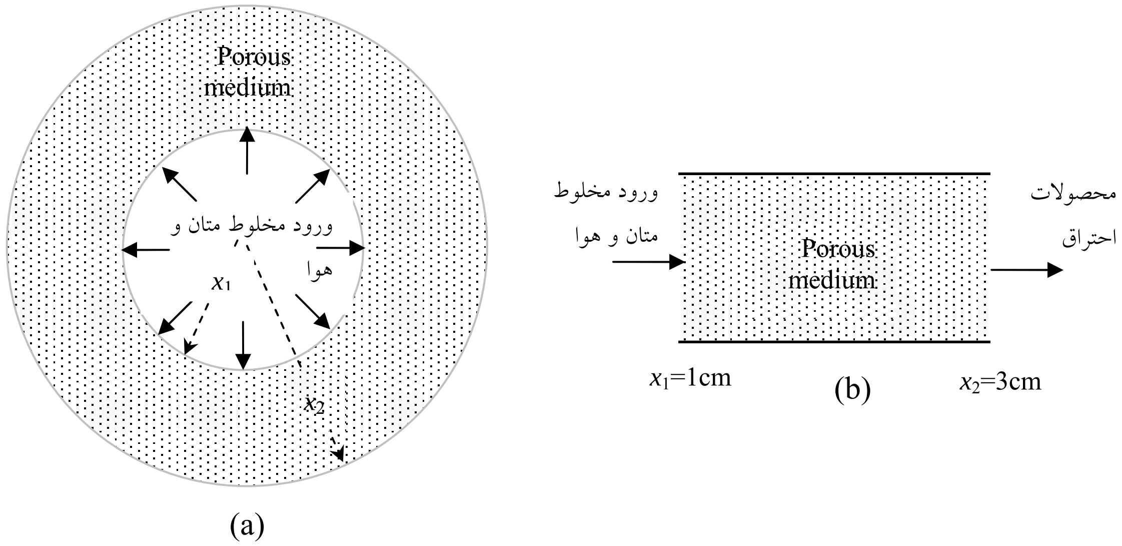
هندسه‌ی مشعل‌های متخلخل شعاعی و محوری

شماتیک دو مشعل متخلخل جریان محوری و شعاعی در شکل (۱) نشان داده شده است. مشعل بررسی شده دارای شعاع داخلی و خارجی به ترتیب ۱ و ۳ سانتی‌متر است. مشعل محوری نیز مانند مشعل شعاعی دارای طول ۲ سانتی‌متر است. خواص ماده‌ی استفاده شده در مدل‌سازی هر دو مشعل در جدول (۲) نشان داده شده است.

نتایج و بحث

برای آن‌که بتوان دو مشعل متخلخل جریان محوری و شعاعی را با هم مقایسه نمود جریان جرم و نسبت سوخت به هوای ورودی به هر دو مشعل یکسان در نظر گرفته شده است، در نتیجه هر دو مشعل دارای مصرف سوخت یکسانی می‌باشند. سطح مقطع عبور جریان در ورودی دو مشعل و هم‌چنین مسیر طی شده در دو مشعل نیز برابر می‌باشند. ولی باید در نظر داشت که سطح تبادل حرارت در مشعل شعاعی سطح جانبی (=۱۲π) است و بزرگتر از سطح تبادل حرارت در مشعل محوری (=٤π) است.

پارامترهایی که در این قسمت به آنها پرداخته شده است عبارتند از پروفیل‌های سرعت و دما، انتشار آلاینده‌ها و بازده تشعشع خروجی دو مشعل.



شکل ۱ شماتیکی از مشعل متخلخل: جریان شعاعی (a)، جریان محوری (b)

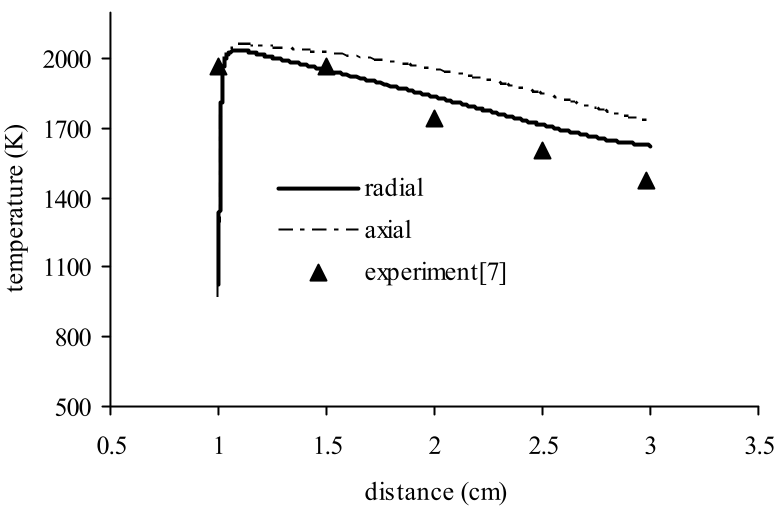
جدول ۲ خواص ماده‌ی متخلخل مورد استفاده [11,12]

$\beta = ۱۷۰۷ m^{-1}$	$\sigma_s = ۱۳۶۵\ m^{-1}$
$H_V = ۲/۵ \times ۱۰^{۷} W/m^3.K$	$\lambda_s = ۳/۶\ W/m.K$
$\rho_s = ۵۱۰\ kg/m^3$	$\varphi = ۰/۸۷$ for ۳/۹ PPC
$c_{ps} = ۸۲۴\ J/kg.K$	$\varepsilon = ۰/۳$

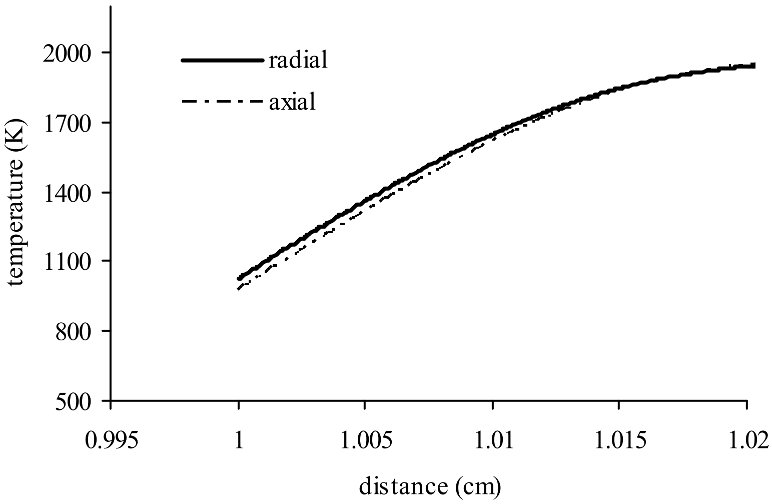
پروفیل دما

در شکل (۲) نمودار پروفیل دمای گاز در دو مشعل موردتحقیق و نتایج آزمایشگاهی کمال و محمد [7] نشان داده شده است. در شکل ملاحظه می‌شود که دما در مشعل محوری از دمای مشعل جریان شعاعی بیشتر است. علت این پدیده را می‌توان در تفاوت میزان انتقال گرمای تشعشعی در دو مشعل جستجو نمود. بدین‌معنی‌که در مشعل شعاعی به‌علت افزایش سطح مقطع در راستای جریان، سطحی که تبادل گرمای تشعشعی را انجام می‌دهد نسبت به حالت جریان محوری بیشتر است. در نتیجه گرمای بیشتری از طریق تشعشع به مقطع پیشگرم و محیط خارج از ناحیه انتشار شعله منتقل می‌شود و همین امر سبب کاهش دما در ناحیه انتشار شعله در مشعل متخلخل شعاعی نسبت به مشعل متخلخل محوری می‌گردد. همان‌گونه که در ناحیه شعله مشاهده می‌گردد تقریب قابل قبولی بین داده‌های تجربی و نتایج حل عددی وجود دارد (این ناحیه در شکل (۳) بزرگ‌نمایی شده است). از آن‌جاکه دو حالت مشعل شعاعی و محوری به‌صورت یک‌بعدی مدل‌سازی شده‌اند، اتلاف حرارت جانبی در آنها لحاظ نشده است و بنابراین بخشی از تفاوت بین نتایج تجربی و عددی پروفیل دما در ناحیه بیرونی مشعل به‌دلیل آن می‌باشد و بخشی از این تفاوت به دلیل عدم قطعیت در خواص انتقال حرارت (به خصوص ضریب هدایت و خواص تشعشعی) ماده متخلخل است [2].

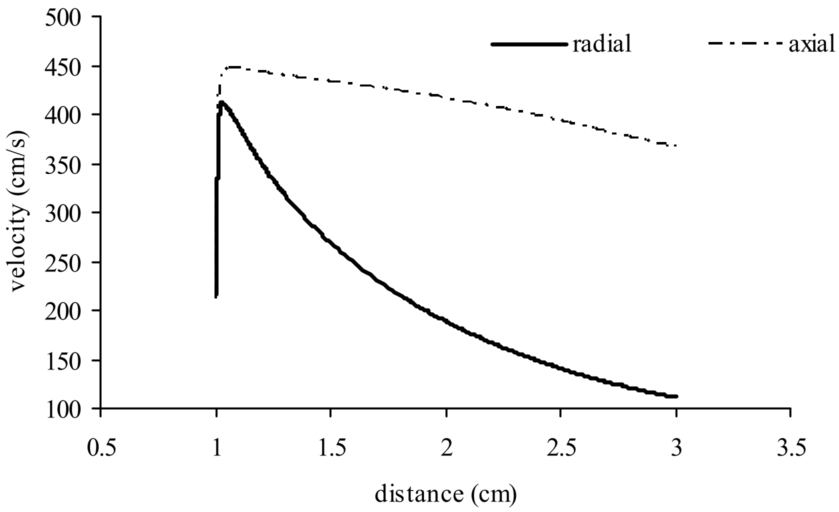
بنابر دلایل ذکر شده انتظار می‌رود که دمای گاز برای مشعل با جریان شعاعی در ناحیه‌ی انتشار شعله کمتر و در ناحیه‌ی پیشگرم نسبت به مشعل جریان محوری بیشتر باشد. توزیع دما در ناحیه‌ی تشکیل شعله (قبل از رسیدن به دمای ماکزیمم) در شکل (۳) نشان داده شده است. دمای مشعل شعاعی در ابتدای ناحیه‌ی تشکیل شعله در حدود $۵۰^\circ C$ از مشعل محوری بیشتر است که در نزدیکی ناحیه‌ی انتشار شعله این اختلاف به صفر رسیده و سپس دمای مشعل محوری بیشتر می‌شود، تا حدی که در خروجی اختلاف دمای دو مشعل به حدود $۱۰۰^\circ C$ می‌رسد.



شکل ۲ تغییرات دمای گاز برای دو مشعل در جهت جریان در مقایسه با نتایج تجربی مشعل شعاعی مرجع [7].



شکل ۳ تغییرات دمای گاز در دو مشعل در مقطع تشکیل شعله



شکل ٤ تغییرات سرعت در مشعل متخلخل شعاعی و محوری در جهت جریان

پروفیل سرعت

در فرآیند احتراق در ناحیه‌ای که شعله شکل می‌گیرد دمای گاز به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد، که این افزایش ناگهانی دما کاهش دانسیته‌ی گاز و در پی آن افزایش ناگهانی سرعت به‌خاطر بقای جرم در جریان را به دنبال دارد. هنگامی که سرعت ورودی به مشعل زیاد باشد این افزایش ناگهانی سرعت در ناحیه‌ی تثبیت شعله به این دلیل که مخلوط فرصت کافی برای محترق شدن را دارا نیست، ممکن است سبب ناپایداری شعله شود. مشعل با جریان شعاعی به‌علت کاهش سرعت در راستای جریان می‌تواند مشکل ایجاد ناپایداری را حل نماید. در شکل (٤) نمودار سرعت بر حسب طول

مشعل برای دو مشعل متخلخل شعاعی و محوری نشان داده شده است.

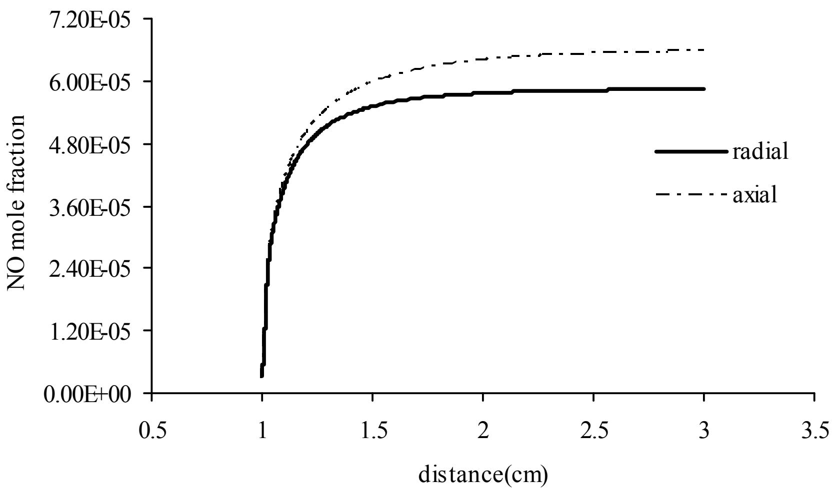
در مشعل شعاعی به دو دلیل سرعت در راستای جریان نسبت به مشعل متخلخل محوری کمتر است، یک دلیل افزایش سطح مقطع عبوری جریان در راستای جریان می‌باشد که به‌خاطر بقای جرم، کاهش سرعت را به همراه دارد. دلیل دوم پایین‌تر بودن دمای گاز در نتیجه‌ی انتقال گرمای بالاتر به محیط اطراف و به دنبال آن دانسیته بالاتر در مشعل شعاعی است.

انتشار آلاینده‌ها

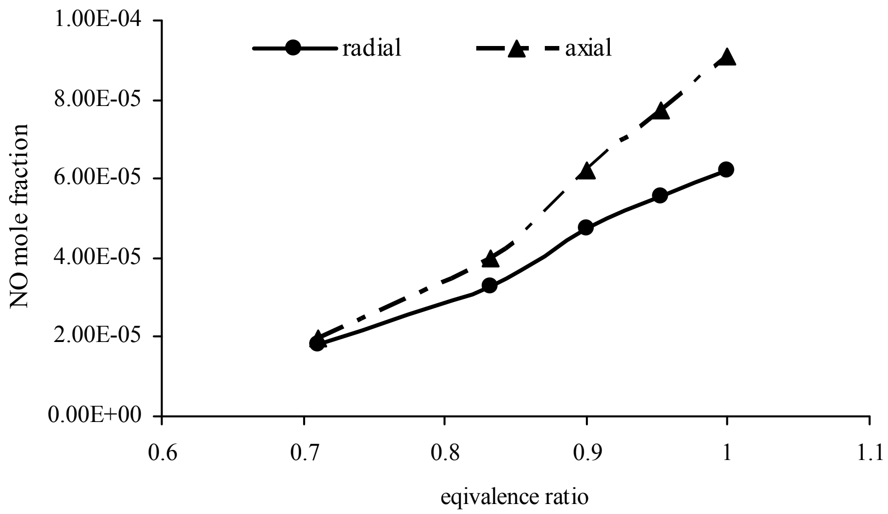
به‌طور کلی در یک مشعل متخلخل میزان انتشار آلاینده‌ها در مقایسه با مشعل با شعله‌ی آزاد کمتر است که این خود یک دلیل مهم برای استفاده از مشعل‌های متخلخل می‌باشد. با توجه به بررسی‌های انجام شده دمای گاز در مشعل موثرترین عامل در نرخ تولید NO می‌باشد و هرچه دمای گاز بالاتر باشد انتشار آلاینده‌ی NO نیز بیشتر است [13]. در شکل (۵) نمودار کسر مولی آلاینده‌ی NO بر حسب فاصله درون مشعل‌های شعاعی و محوری نشان داده شده است.

علت این تفاوت میان انتشار NO در دو مشعل را می‌توان با اختلاف در توزیع دما و سرعت درون مشعل‌ها توجیه نمود. سرعت در مشعل متخلخل شعاعی نسبت به حالت محوری کمتر است و همان‌گونه که قبلا نیز اشاره شد این پایین‌تر بودن سرعت افزایش، زمان ماندگاری را در پی دارد. از طرفی افزایش زمان، ماندگاری تولید آلاینده‌ی NO را افزایش می‌دهد [13]. اما در مورد پروفیل دما ملاحظه گردید که دمای گاز در مشعل شعاعی نسبت به مشعل محوری کمتر است و این در کاهش تولید NO عاملی مثبت به شمار می‌آید. یعنی مشعل شعاعی دارای یک ویژگی منفی (زمان ماندگاری بالاتر) و یک ویژگی مثبت (دمای گاز پایین‌تر) در انتشار NO نسبت به مشعل محوری می‌باشد. شکل (۵) به خوبی نشان می‌دهد عامل دمای پایین گاز بر عامل زمان ماندگاری بالا غلبه کرده است و نتیجه‌ی مقایسه حاکی از انتشار کمتر NO در مشعل شعاعی نسبت به مشعل محوری است. در شکل (٦) نمودار انتشار NO بر حسب نسبت هم ارزی در یک FR(Firing rate) ثابت نشان داده شده است. FR عبارت است از نرخ سوختن و مقدار آن از حاصل‌ضرب جریان جرم سوخت در ارزش حرارتی پایین‌تر به‌دست می‌آید.

$$FR = \dot{m}_{fuel} \cdot LHV \qquad (۸)$$



شکل ۵ تغییرات کسر مولی NO در جهت جریان



شکل ٦ تغییرات کسر مولی NO بر حسب نسبت هم ارزی

در مشعل متخلخل شعاعی کاهشی حدود ۳۰ درصد در انتشار NO نسبت به مشعل متخلخل محوری در مخلوط استوکیومتریک مشاهده شد، این درحالی‌است‌که در مورد آلاینده CO میزان این کاهش بیشتر است. در شکل (۷) کسر مولی آلاینده‌ی CO در طول دو مشعل نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل نیز ملاحظه می‌شود در ابتدای ناحیه‌ی تشکیل شعله مقدار CO با شیب بسیار زیاد افزایش یافته و به یک مقدار تقریباً مساوی در هر دو مشعل می‌رسد. سپس از این نقطه تا انتهای هر دو مشعل کاهش کسر مولی CO مشاهده می‌گردد، اما شدت این کاهش در دو مشعل متفاوت است و در مشعل شعاعی با شدت بیشتری نسبت به مشعل محوری کاهش می‌یابد. علت این پدیده نیز به کاهش سرعت در راستای شعاع در مشعل شعاعی مربوط می‌شود، چرا که این کاهش سرعت، سبب افزایش زمان ماندگاری می‌شود و میزان بیشتری CO به CO_2 تبدیل شده، طوری‌که برای نمونه در نسبت اختلاط استوکیومتریک کسر مولی CO خروجی مشعل شعاعی ppm ۲۲۹۰ و در مشعل محوری این مقدار برابر ppm ۵۵٤۱ است. یعنی در مشعل متخلخل شعاعی انتشار آلاینده‌ی CO در حدود ٦۰ درصد نسبت مشعل متخلخل محوری کمتر است. لازم به ذکر است که کسر مولی CO خروجی در تحقیق آزمایشگاهی مرجع [7] برای نسبت اختلاط استوکیومتریک در حدود ppm ۲۱۰۰ به‌دست آمد، که با توجه به یک‌بعدی بودن مدل‌سازی حاضر، از این جهت نتیجه‌ی به‌دست آمده از این تحقیق تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

در شکل (۸) نمودار کسر مولی CO برای مشعل متخلخل شعاعی و محوری بر حسب FR در نسبت سوخت به هوای استوکیومتریک نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش FR و به دنبال آن افزایش سرعت ورودی میزان انتشار CO در هر دو مشعل زیاد می‌شود. علت این روند در شکل (۸) کاهش زمان ماندگاری در دو مشعل به خاطر افزایش سرعت ورودی است.

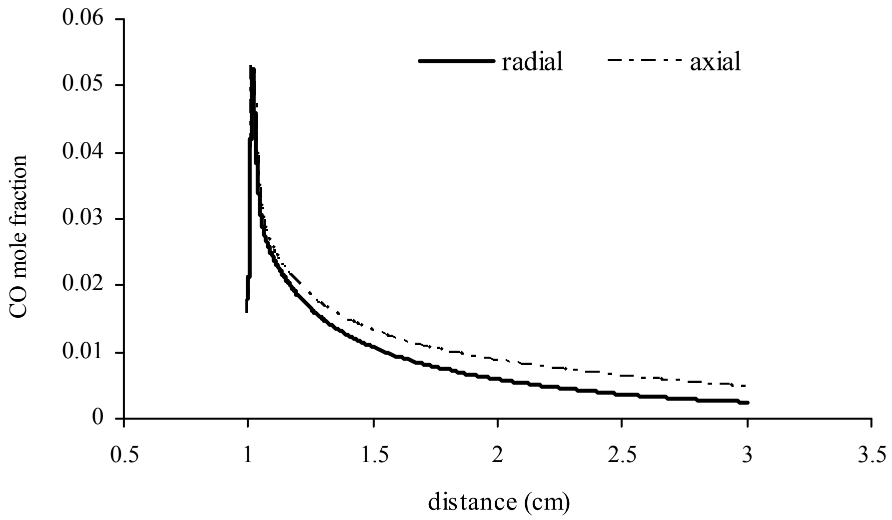
بازده تشعشع خروجی

یکی دیگر از پارامترهایی که در این مطالعه به آن پرداخته شده است بازده تشعشع خروجی است، که

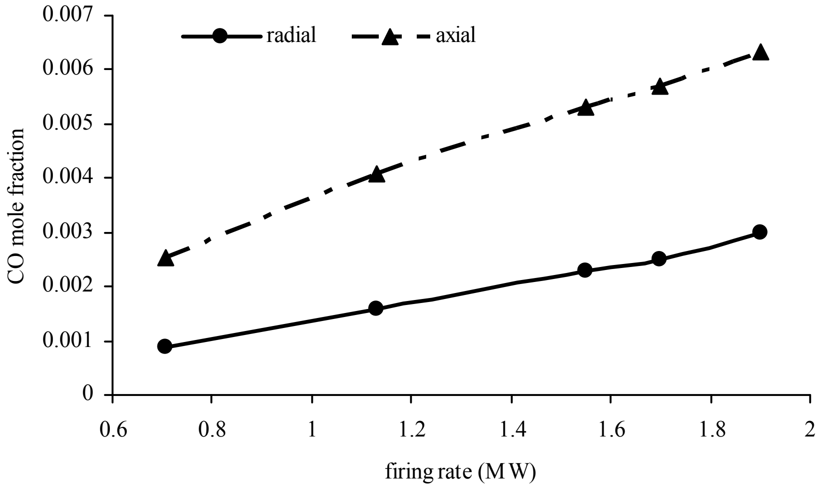
توسط رابطه‌ی (۹) تعریف می‌شود.

$$\eta_{rad} = \frac{\sigma \varepsilon A_{out}(T_s^4 - T_{surround}^4)}{FR} \qquad (۹)$$

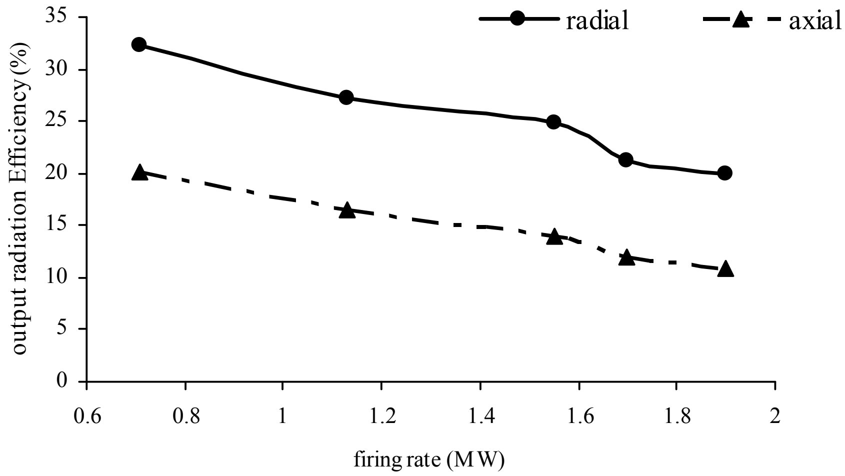
نتایج ایـن مطالعـه نشـان داد کـه دمـای مشـعل متخلخل با جریان شعاعی نسبت به جریان محـوری در هر دو فاز گاز و جامد کمتر است. بـه‌طـوری‌کـه بـرای مثال در نسبت سوخت به هوای اسـتوکیومتریک دمـای جامد در خروجی مشعل شـعاعی برابـر ۱۵٤۲K و در مشعل محوری برابر با ۱۷٦۸ Kمی‌باشـد. در نگـاه اول چنین به نظر می‌رسد که مشعل محوری انتقـال گرمـای تشعشعی بیشتری به محیط بیرون داشـته باشـد، امـا در واقع میزان انتقال گرمای تشعشعی به خارج مشـعل در مشعل شعاعی به خاطر وسعت سطح تبادل گرما است. به‌گونه‌ای کـه انتقـال گرمـای تشعشـعی بـه محـیط در مشـعل شـعاعی برابـر ۳٦۷ kW و در مشـعل محـوری برابر ۲۱۱ kW بوده، در حالی که مقدار FR برای هـر دو مشعل برابرkW ۱۵۵۰ است، یعنـی بـازده تشعشـع خروجـــی در مشـــعل شـــعاعی برابـــر ۲۳/۷٪ و در مشعل محوری برابر ۱۳/٦٪ خواهد بـود. در شـکل (۹) بازده تشعشع خروجـی بـر حسـب FR بـرای نسـبت سوخت بـه هـوای اسـتوکیومتریک نمـایش داده شـده است. افـزایش مقـدار FR افـزایش دمـا در خروجـی مشعل را به همراه دارد که نتیجـه‌ی آن افـزایش انتقـال گرمای تشعشعی به محیط خـارج اسـت، یعنـی مقـدار صورت معادله‌ی (۹) افـزایش مـی‌یابـد، امـا در شـکل مشخص است که با افزایش FR به خـاطر زیـاد شـدن مخرج کسر معادله‌ی (۹) بازده تشعشـع خروجـی کـم شده است. بـارا و الـزی نیـز در مـورد مشـعل جریـان محوری، به ایـن نتیجـه دسـت یافتنـد [12]. در شـکل (۱۰) بازده تشعشع خروجی برای یک مقدار FR ثابت بر حسب نسبت هم‌ارزی ملاحظه می‌گردد. هـر چـه از نسبت هم‌ارزی‌های پایین به مقدار ۱ نزدیک مـی‌شـویم مقدار بازده بیشتر می‌شود چرا که با بزرگتر شدن نسبت هم‌ارزی دمای جامد در خروجی مشعل افزایش می‌یابـد. البته در هر دو شکل (۱۰ و ۹) بیشتر بودن بازده تشعشـع خروجـی مشـعل متخلخـل شـعاعی نسـبت بـه مشـعل متخلخل محوری آشکار است.



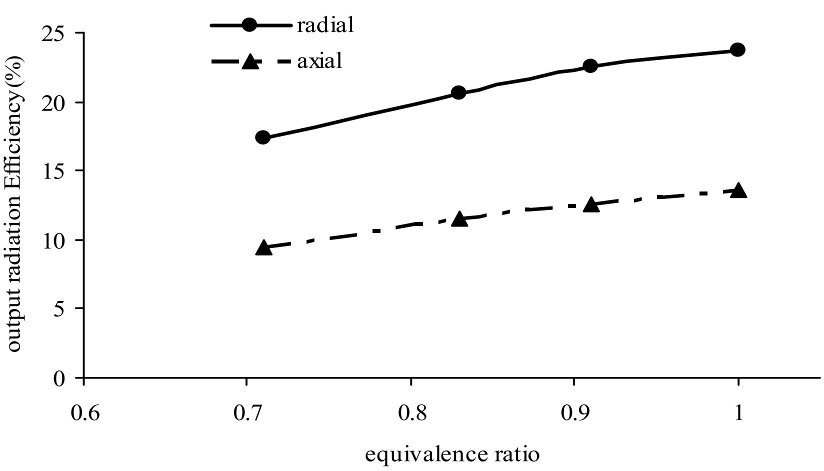
شکل ۷ تغییرات کسر مولی CO در جهت جریان



شکل ۸ کسر مولی CO بر حسب FR



شکل ۹ بازده تشعشع خروجی بر حسب FR



شکل۱۰ بازده تشعشع خروجی بر حسب نسبت هم ارزی

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی عملکرد مشعل متخلخل با جریان شعاعی از جهت توزیع سرعت، دما، انتشار آلاینده‌ها و بازده تشعشع خروجی در مقایسه با مشعل‌های متخلخل متداول با جریان محوری پرداخته شد و ملاحظه گردید که عملکرد مشعل با جریان شعاعی از لحاظ پارامترهای ذکر شده مطلوب‌تر از مشعل متخلخل با جریان محوری است. در نتایج مشاهده گردید مهمترین عواملی که باعث ایجاد برتری در مشعل متخلخل شعاعی نسبت به محوری می‌گردند کاهش سرعت و افزایش سطح مقطع در راستای شعاع می‌باشد. نتایج حل عددی نشان داد به خاطر افزایش سطح مقطع در راستای جریان شار گرمای تشعشعی منتقل شده از ناحیه‌ی انتشار شعله افزایش می‌یابد. این عامل سبب کاهش دمای منطقه‌ی انتشار شعله و به دنبال آن کاهش ۳۰ درصدی NO خروجی از مشعل می‌گردد. از طرف دیگر کاهش سرعت در راستای شعاعی موجب گردید که میزان انتشار آلاینده‌ی CO نیز حدود ٦۰ درصد کاهش یابد، علت این پدیده نیز افزایش زمان ماندگاری به خاطر کم شدن سرعت بود. در مورد بازده تشعشع خروجی نیز ملاحظه گردید به خاطر بیشتر بودن سطح تبادل گرمایی با محیط بیرون، مقدار این بازده در مشعل متخلخل شعاعی نسبت به مشعل متخلخل محوری بیشتر است.

فهرست نمادها و نشانه‌ها

سطح مقطع	A
ظرفیت ویژه‌ی حرارتی	C_p
نرخ سوختن تعریف شده در معادله (۸)	FR
ضریب انتقال گرمای حجمی بین گاز و محیط متخلخل	H_v
شدت تشعشع	I
جریان جرم	$\dot{m}$
بردار یکه در معادله تشعشع	$\hat{n}$
فشار	p
شار گرمایی تشعشعی	q_{rad}
بردار موقعیت در معادله تشعشع	$\vec{r}$
جهت انتشار پرتو تشعشعی	$\hat{s}$
دما	T
سرعت گاز	u
سرعت دیفیوژن گونه ی k ام	V_k
وزن مولکولی گونه‌ی k ام	W_k
کسر مولی	X_k
مختصات طولی	x
کسر جرمی گونه‌ی k ام	Y_k

حروف یونانی

ضریب تضعیف تشعشعی	β
ضریب صدور	ε
تخلخل	φ
تابع فازی	Φ
ضریب هدایت حرارتی	λ
چگالی گاز	ρ
ثابت استفان بولتزمن	σ
ضریب جذب محیط	σ_a
ضریب پراکنده سازی	σ_s
ضخامت نوری	τ
زاویه‌ی فضایی	Ω
شدت تولید مولی گونه‌ی k ام	C

زیرنویس‌ها

گاز	g
جامد	s
گونه‌ی k ام	k
ورودی	in
خروجی	out
محیط	Surround
تشعشعی	rad

مراجع

1. Khosravy EL-Hossaini M., Maerefat, M. and Mazaheri, K., "Numerical investigation on the effects of pressure drop on thermal behavior of porous burner", *ASME Journal of Heat Transfer,* Vol. 130, pp. 032601,1-5, (2008).
2. Maerefat, M., Khosravy EL-Hossaini, M. and Mazaheri, K., "Numerical modeling of two-dimensional cylindrical porous radiant burner with sidewall heat loses", *Journal of Porous Media Transfer,* 14(4), pp. 317-327, (2011).
3. Kamal, M.M. and Mohamad, A.A., "Combustion in porous media", *Journal of Power and Energy,* Vol. 220, pp. 487-508, (2006).
4. Wood, s. and Harris, A.T., "Porous burners for lean-burn applications", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, PP 667-684, (2008).
5. Zhdanok, S.A., Dobrego, K.V. and Futko, S.I., "Flame localization inside axis-symmetric cylindrical and spherical porous media burners", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 41, pp. 3647-3655, (1998).
6. Zhdanok, S. A., Dobrego, K. V. and Futko, S. I., "Effect of porous media transparency on spherical and cylindrical filtration combustion heater performance", *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 43, pp. 3469-3480, (2000).
7. Kamal, M.M., and Mohamad, A.A., "Development of cylindrical porous-medium burner", *Journal of Porous Media,* Vol. 9, pp. 469-481, (2006).
8. Kee, R., Grcar, J., Smooke, M. and Miller, J., "A Fortran program for modeling steady laminar one dimensional premixed flames", Technical Report SAND 85-8240, Sandia National Laboratories. (1985).
9. Sung, C.J., Law, C.K. and Chen, J.Y. "Augmented reduced mechanisms for no emission in methane oxidation", *Combustion and Flame*, Vol. 125, pp. 906–919, (2001).
10. Khosravy El-Hossaini, M., Maerefat, M. and Mazaheri, K., "Numerical modeling of porous radiant burner using full and reduced kinetics mechanism", *Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering,* Vol. 27, PP. 53-63, (2008).
11. Zhou, X.Y. and Pereira, J. C. F., "Numerical study of combustion and pollutant formation in inert nonhomogeneous porous media", *Combustion Science and Technology*, Vol. 130, pp. 335-364, (1997).

12. Amanda, J. Barra and Janet, L. Ellzey., "Heat recirculation and heat transfer in porous burners", *Combustion and Flame*, Vol. 137, pp. 230-241, (2004).

13. Turns, S. R., "*An Introduction to Combustion: Concept and Application*", 2nd Edition, McGraw-Hill, (2000).